

*bac2010 - 2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável
2º Congreso Ibérico sobre hormigón auto-compactável
Guimarães – 1 e 2 de Julho de 2010*

Influência de adições de resíduos no comportamento reológico da fase argamassa de betões auto-compactáveis



Luiz Pereira de Oliveira¹



Miguel Nepomuceno²

RESUMO

Estudos recentes comprovam a eficiência das metodologias de dosagem baseadas na fase argamassa de betões auto-compactáveis. A adequação das propriedades reológicas na fase argamassa tem sido potencialmente reveladora do comportamento final da fase betão. Nas misturas onde as propriedades de auto-compactabilidade são asseguradas com o uso de volume significativo de material fino, tem-se recorrido comumente à incorporação de cinza volante ou outros tipos de adições, não necessariamente pozolânicas. Alguns investigadores têm-se ocupado em viabilizar a reciclagem de resíduos urbanos e industriais para a produção de pós e a sua incorporação como componente do betão auto-compactável. Desta forma, este artigo apresenta os resultados de um estudo experimental, no qual se verificou a influência da incorporação de resíduos, tais como: cinza de biomassa e pó de vidro nas propriedades reológicas da fase argamassa de betões auto-compactáveis. Esta verificação foi realizada comparativamente com um filer calcário industrial e uma mistura padrão sem adição. As propriedades reológicas foram avaliadas através de ensaios empíricos e por reometria. As percentagens de substituição do cimento pela adição foram de 0%, 20% e 40%. A correlação dos resultados obtidos pelos ensaios empíricos e pela reometria possibilitaram constatar que a adição de pó de vidro é significativamente favorável ao comportamento reológico desejado às misturas. Para um padrão de auto-compactabilidade definido à priori foi possível ajustar um modelo reológico que representa o comportamento observado em cada mistura.

PALAVRAS-CHAVE

Betão auto-compactável, fase argamassa, reologia, adições, resíduos industriais

¹ Universidade da Beira Interior, Centre of Materials and Building Technologies, 6200-001 Covilhã, Portugal.
luiz.oliveira@ubi.pt

² Universidade da Beira Interior, Centre of Materials and Building Technologies, 6200-001 Covilhã, Portugal.
mcsn@ubi.pt

1. INTRODUÇÃO

O avanço atual da tecnologia de betão permite conceber e produzir misturas de grande fluidez, tornando possível a colocação do betão em cofragens complexas não só pelas suas reduzidas dimensões e características geométricas, mas também as que apresentam áreas congestionadas de armaduras. Esta colocação pode ser realizada sem nenhuma vibração ou seja apenas com o peso próprio do betão. O betão auto-compactável (BAC) gerou um enorme interesse industrial por causa de suas oportunidades económicas (trabalho reduzido e construção acelerada), melhoria de qualidade do betão, e a sua relação amigável com o meio ambiente [1].

Na última década, inúmeros estudos foram desenvolvidos com o objetivo de desenvolver métodos de ensaios e assim poder avaliar as propriedades de fluidez do BAC. Entretanto, a investigação sobre o mecanismo de escoamento do betão e a sua auto-consolidação tem sido limitada. Os métodos de dosagens do BAC são ainda baseados num processo de tentativa e erro. O desenvolvimento e aplicação do BAC estão exigindo uma melhor compreensão do comportamento reológico fundamental dos componentes do BAC.

São muitos os modelos reológicos desenvolvidos para estudar e prever o comportamento do betão no estado fresco. Entre os modelos empregues, o modelo de Bingham é o mais aplicado ao betão normal [2]. O modelo de Bingham expressa de maneira simples a evolução da tensão e do escoamento do betão: $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$, onde τ_0 é a tensão de cedência, μ o coeficiente de viscosidade plástica e $\dot{\gamma}$ a velocidade de corte. Porém, de acordo com alguns investigadores [3,4], o comportamento no estado fresco do betão auto-compactável tem sido melhor descrito pelo modelo de Herschel–Bulkley, expresso por $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}^b$, onde b é uma constante do modelo que indica o grau de comportamento não Newtoniano, valores de b maiores que 1 indicam comportamento reofluidificante e valores menores comportamento reoespessante. Os parâmetros destes modelos resultam de um ajuste dos dados experimentais obtidos no ensaio de reologia, caracterizando-se desta forma como modelos semi-empíricos e que não descrevem diretamente os efeitos da combinação dos materiais e das suas proporções sobre o comportamento reológico do betão [5].

Modelos baseados em duas fases foram desenvolvidos por Topçu e Kocataskin [6] e Kurokawa et al [7]. Nestes modelos, o betão foi considerado como sendo composto de duas fases: uma fase de matriz de argamassa e uma fase grosseira agregado. Gang et al [5] aplicaram o conceito de duas fases em argamassas, considerando uma fase de matriz pasta e uma fase de agregados finos. Outros modelos mais sofisticados, porém menos práticos à engenharia, foram desenvolvidos considerando o betão fresco como um material multifásico, Pimanmas e Ozawa desenvolveram um modelo matemático para a previsão de fluidez com base no conceito de conservação de energia [8].

No presente estudo, desenvolvido em fase argamassa de betões, avalia-se a influência de 3 tipos de adições no comportamento reológico de misturas auto-compactáveis. Neste estudo, aplicam-se os modelos reológicos de Bingham e de Herschel–Bulkley, juntamente com os métodos empíricos de espalhamento e do funil V. Semelhante à argamassa, o BAC fresco também pode ser considerado como um material composto constituído por duas fases distintas, um grupo de grandes partículas rígidas (agregado graúdo) dispersos em uma matriz fluida (argamassa). Portanto, a análise desenvolvida no presente estudo para argamassa pode ser facilmente aplicada ao betão.

2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Os ligantes utilizados foram um cimento portland (CEM I 42,5R) com massa volúmica média de 3140 kg/m³. As adições incluíram o filler calcário com massa volúmica de 2720 kg/m³, uma cinza de resíduo de biomassa com massa volúmica de 2847 kg/m³ e pó de vidro com massa volúmica de 2528 kg/m³.

Foi utilizado um superplastificante cuja base química é constituída por carboxilatos modificados, e com uma massa volúmica de 1050 kg/m³. O agregado fino é constituído por uma areia fina de granito britado, com massa volúmica de 2708 kg/m³ e módulo de finura de 2,52.

2.2 Proporções das misturas

Foram estabelecidas várias associações de materiais finos contendo o cimento e as três adições minerais selecionadas para este trabalho, conforme se ilustra no Quadro 1. Cada uma das misturas de finos é identificada por uma sigla que traduz a dosagem de cada um dos elementos constituintes dessa mistura, expressa em percentagem do volume absoluto total de materiais finos. Assim, por exemplo, a sigla (80C+20FC) representa uma mistura de materiais finos cujo volume absoluto total é constituído em 80% por cimento e em 20% por filer calcário. As outras siglas possuem o seguinte significado: BI significa cinza de biomassa; GL significa pó de vidro.

Quadro 1. Proporções dos materiais finos (em massa)					
Ref.	Misturas	CEM I 42,5R (C)	Cinza de biomassa (BI)	Filer calcário (FC)	Pó de vidro (GL)
1	100C	1,00	---	---	---
2	80C+20BI	0,80	0,20	---	---
3	80C+20FC	0,80	---	0,20	---
4	60C+40FC	0,60	---	0,40	---
5	80C+20GL	0,80	---	---	0,20
6	60C+40GL	0,60	---	---	0,40

2.3 Proporções das misturas

As propriedades reológicas foram avaliadas indiretamente pelo ensaio de espalhamento e de fluidez, expressos, respectivamente, em termos da área de espalhamento relativa (Gm) e velocidade relativa de escoamento (Rm). O “cone de espalhamento” e o “Funil-V” utilizados possuem as dimensões interiores que se apresentam na Fig. 1. A área de espalhamento relativa (Gm) é traduzida pela “Eq.(1)”, enquanto a velocidade relativa de escoamento (Rm), em s⁻¹, é traduzida pela “Eq. (2)”. A sigla (Dm) representa o diâmetro médio de espalhamento, em mm; a sigla (D₀) representa o diâmetro inicial na base do cone, em mm, enquanto a sigla (t) representa o tempo de escoamento no funil-V, em segundos.

$$Gm = \left(\frac{Dm}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$Rm = \frac{10}{t} \quad (2)$$

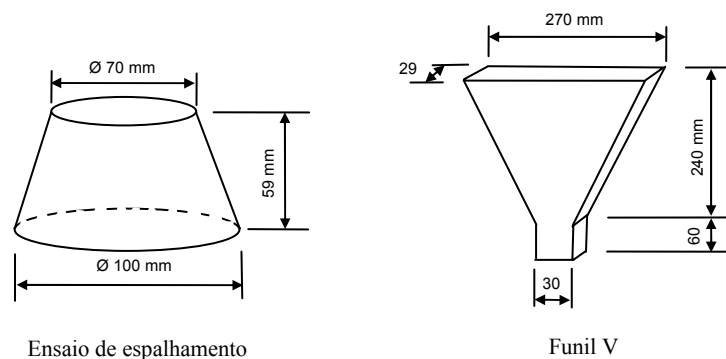


Fig. 1. Dimensões interiores dos ensaios de espalhamento e Funil V

Um procedimento de amassadura foi adotado para todas as misturas. Foram produzidas amassaduras de 1,6 litros cada, utilizando uma misturadora para a produção de pastas e argamassas normalizadas. O procedimento de amassadura foi similar àquele proposto por Domone et al. [9], excepto uma pequena paragem introduzida para limpeza das pás da misturadora. Todos os componentes secos e a totalidade da água são introduzidos na misturadora e procede-se à amassadura a velocidade normal durante seis minutos, seguida de uma paragem de dois minutos e, novamente, uma amassadura de um minuto a velocidade normal. O superplastificante entra na mistura um minuto após o seu início e sem paragem da misturadora. A paragem para limpeza das pás ocorre a meio da primeira fase de mistura.

2.4 Estudos em argamassas

De acordo com a metodologia de dosagem proposta por Nepomuceno [10], a relação $V_p/V_s = 0,70$ (relação em volume absoluto entre a dosagem de materiais finos e a dosagem de agregados finos) foi mantida constante em todas as misturas. Para cada combinação entre a mistura de materiais finos e $V_p/V_s = 0,70$, foram produzidas, em média, 3 a 4 argamassas fazendo variar os parâmetros V_w/V_p (relação em volume absoluto entre a dosagem de água e a dosagem de materiais finos) e $Sp/p\%$ (relação expressa em percentagem entre a dosagem em massa de superplastificante e a dosagem em massa de materiais finos) até que fossem obtidas as propriedades reológicas pretendidas. O intervalo de variação admissível para G_m e R_m é apresentado na Fig. 2, traduzindo-se em valores de G_m entre 5,4 e 6,2 e de R_m entre 1,14 e 1,32 s^{-1} , a que correspondem, respectivamente, valores de D_m entre 253 e 268 mm e de t entre 7,58 e 8,77 s.

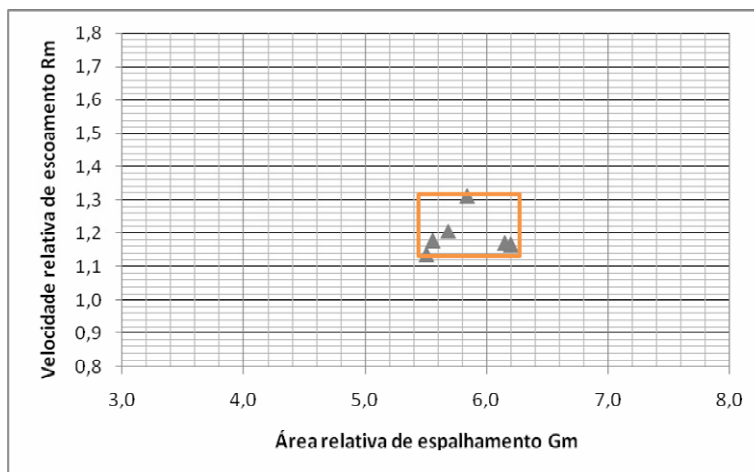


Fig.2. Intervalos admissíveis das propriedades das argamassas frescas de acordo com a metodologia proposta por Nepomuceno

O comportamento reológico das argamassas foi estudado através do reómetro Viskomat NT, ilustrado na Fig. 3.

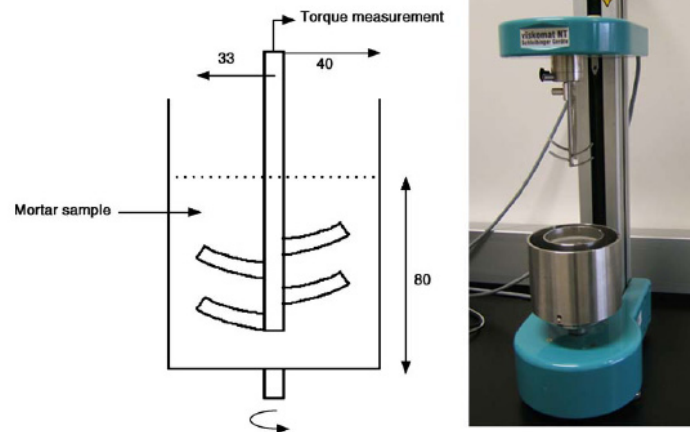


Fig. 3. Detalhes do reômetro Viskomat NT

As medidas foram efetuadas 5 minutos após terminada a mistura. A velocidade de rotação do recipiente que condiciona a amostra pode ser programado e, neste estudo, foi utilizado um perfil denominado “step”. A velocidade de rotação é ajustada para variar com o tempo, passando de um valor inicial de zero a 160 rpm e em seguida de 160 rpm até zero. Em cada patamar, a velocidade é mantida por 1 min antes de subir ou descer 20 rpm cada vez (Fig. 4). Este perfil permite chegar a valores de equilíbrio de torque para cada velocidade e construir as curvas de equilíbrio de escoamento para uma melhor determinação dos coeficientes relativos de viscosidade plástica e a tensão de cedência (h e g, respectivamente).

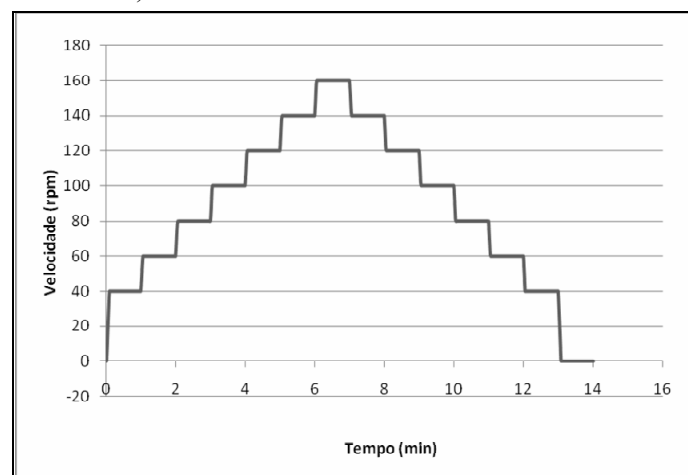


Fig. 4. Perfil de velocidade tipo “step”

A tensão de cedência é a força mínima necessária para quebrar as interações que existem no núcleo do material e iniciar um movimento. Depende do número de lugares que se interagem e da força dessas interações. A tensão de cedência pode ser considerada a resistência à entrada em escoamento uma vez que a viscosidade plástica é uma medida da resistência da mistura ao aumento da velocidade desse escoamento. A tensão de cedência é então uma estimativa da solidez da estrutura mesoscópica do material ao passo que a viscosidade plástica é a medida dos atritos internos.

Outro fenómeno reológico que interessa observar é a tixotropia. Reconhece-se a tixotropia quando a viscosidade de uma mistura diminui durante a cedência e depois aumenta na parada desta para reencontrar, de maneira reversível, uma viscosidade próxima daquela do início. A quebra da rede mesoscópica da mistura não é um estado de equilíbrio. Por esta razão a mistura se reorganiza para reencontrar o seu estado de equilíbrio. A tixotropia caracteriza a velocidade de reconstrução desta rede de grãos e mais precisamente o espaço de reequilíbrio da mistura. Experimentalmente, a tixotropia é quantificada pela área definida pela curva de histereses formada pela aplicação à mistura de um perfil de tensão crescente seguida de um perfil de tensão decrescente. O perfil crescente permite quebrar a

rede e o decrescente permite a sua reconstrução. Um valor elevado de tixotropia corresponde a um sistema (partículas sólidas + fluídos) onde a rede se reconstrói lentamente e inversamente. Uma mistura com elevado valor pode ser vista como sendo um sistema que não se adapta facilmente a cedência porque necessita de muito tempo para se reconstituir [11].

Após cada amassadura foram moldados 4 provetes cúbicos de 50 mm de aresta para serem ensaiados à compressão aos 28 e 90 dias de idade.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O Quadro 2 resume as variações de V_w/V_p e $Sp/p\%$ aplicadas as misturas até a obtenção dos parâmetros G_m e R_m desejados.

Quadro 2. Relações e resultados				
<i>Mistura 100C</i>	V_w/V_p	$Sp/p\%$	G_m	R_m
1	0,90	3,10	9,89	1,29
2	0,80	2,50	10,73	1,01
3	0,85	2,00	8,43	0,53
4	0,95	2,00	11,04	1,78
5	0,90	1,70	6,98	0,97
6	0,90	1,50	2,15	1,02
7	0,90	1,70	6,20	1,17
<i>Mistura 80C+20BI</i>				
2	0,90	2,50	11,57	1,13
3	0,90	2,10	8,46	1,14
4	0,90	1,90	11,75	1,26
5	0,80	1,90	11,57	1,13
6	0,85	1,90	11,57	1,13
7	0,90	1,80	6,15	1,17
<i>Mistura 80C+20FC</i>				
1	0,90	1,70	11,67	2,50
2	0,80	1,60	8,64	1,13
3	0,80	1,45	5,50	1,14
<i>Mistura 60C+40FC</i>				
1	0,80	1,50	5,92	0,73
2	0,85	1,55	5,84	1,31
<i>Mistura 80C+20GL</i>				
1	0,85	1,60	2,05	0,26
2	0,90	1,60	5,35	1,07
3	0,92	1,60	5,55	1,17
<i>Mistura 60C+40GL</i>				
1	0,90	1,50	11,04	1,73
2	0,90	1,45	5,68	1,21

As misturas sombreadas, no Quadro 2, são aquelas que atingiram os valores desejados e estão localizadas dentro do alvo indicado na Fig. 2. Constata-se no Quadro 2 que o alvo de auto-compactabilidade foi atingido com valores de V_w/V_p entre 0,8 a 0,9, sendo que os mais baixos valores de $Sp\%/p$ foram obtidos com as misturas 80C + 20FC e 60C + 40GL. Esta última com uma quantidade

de adição superior, demonstrando portanto que a adição de pó de vidro é vantajosa do ponto de vista de substituição parcial do cimento.

No Quadro 3 apresentam-se os valores dos parâmetros reológicos, para as misturas ensaiadas, obtidos pelo modelo de Bingham, no qual T representa o valor do torque medido no reómetro para uma velocidade N. Neste podemos constatar valores negativos para o parâmetro g, o que indica que o modelo de Bingham, nestes casos, não é um identificador adequado do parâmetro g. Em contrapartida, o modelo de Herschel–Bulkley traduz de maneira mais apropriada o comportamento das misturas auto-compactáveis identificando que as misturas 80C+20FC e 60C+40GL pelos seus valores de constantes b menores que 1,0 apresentam comportamento reoespessante enquanto que as demais misturas tem um comportamento reofluidificante.

Quadro 3. Equações dos modelos

Misturas	Modelo de Bingham	R^2	Modelo de Herschel–Bulkley	R^2
100C	$T = -7,372 + 0,994 N$	0,979	$T = 1,538 + 0,221N^{1,3}$	0,992
80C+20BI	$T = -6,521 + 1,355N$	0,973	$T = 2,834 + 0,790N^{1,1}$	0,973
80C+20FC	$T = 41,445 + 2,214N$	0,910	$T = 7,732 + 9,415N^{0,7}$	0,926
60C+40FC	$T = -1,121 + 0,386N$	0,993	$T = 0,170 + 0,233N^{1,1}$	0,995
80C+20GL	$T = -4,142 + 0,779N$	0,986	$T = 0,795 + 0,286N^{1,2}$	0,992
60C+40GL	$T = 0,310 + 0,061N$	0,978	$T = 0,197 + 7,894N^{0,95}$	0,973

Se analisarmos as curvas de escoamento apresentadas na Fig. 5, constata-se que as misturas cujos escoamentos ocorrem sob baixas tensões são as misturas 60C+40GL e 60C+40FC. Com exceção das misturas 80C+20BI e 80C+20FC as curvas foram obtidas com os valores do perfil “step” descendentes. Presume-se, portanto, que o facto de utilizar os valores ascendentes do perfil tenha contribuído para a acentuada diferença destas duas misturas entre as demais.

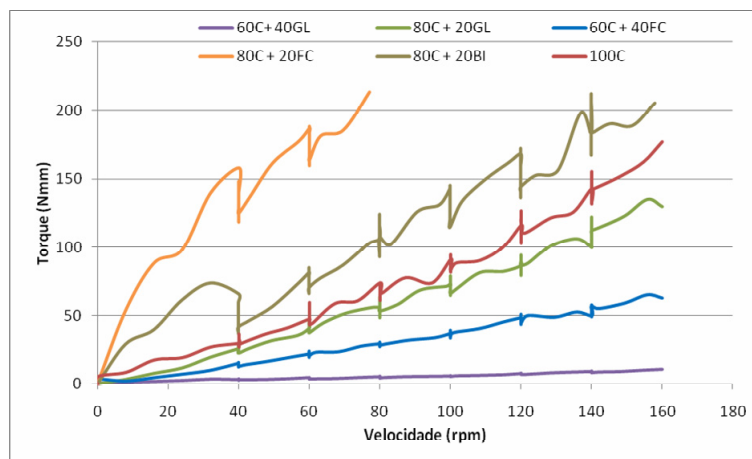


Fig.5. Curvas de escoamento torque versus velocidade

Na Fig. 6, pode-se constatar o comportamento tixotrópico das misturas, sendo este mais acentuado para a mistura 80C + 20GL e 100C. Para os conteúdos de adições mais elevados 40GL e 40FC as áreas das curvas de histereses são menores, o que identifica o contributo do aumento dessas adições na reologia das misturas. O pó de vidro no teor de 40% de adição foi aquele que ofereceu melhor escoamento.

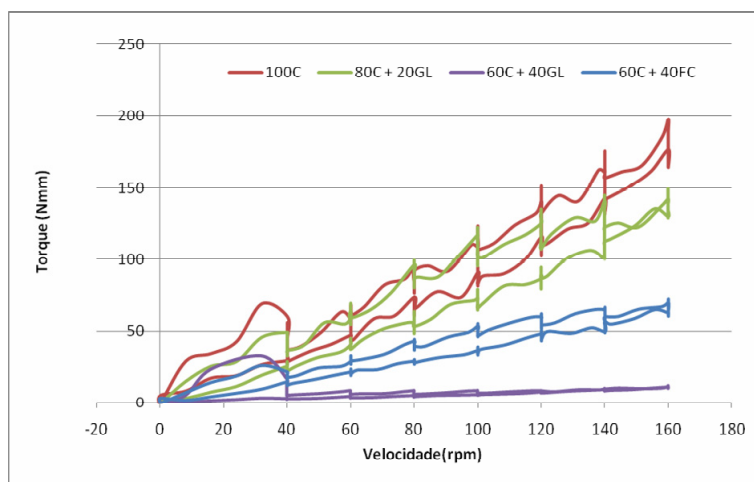


Fig.6. Comportamento tixotrópico das misturas

Nas Figs. 7 e 8 foram correlacionados os valores dos parâmetros reológicos g e h , obtidos pelo modelo de Bingham, com os ensaios empíricos de determinação da área de espalhamento relativa (G_m) e velocidade relativa de escoamento (R_m). Observa-se na Fig. 7 que a aplicação do modelo de Bingham se traduz em valores de tensão de cedência g negativos o que não corresponde com a realidade do fenómeno que se mede. Não obstante, os valores medidos tendem a uma constância na medida em que se aumenta o valor de G_m , tendência perfeitamente lógica pela alta fluidez das misturas ensaiadas.

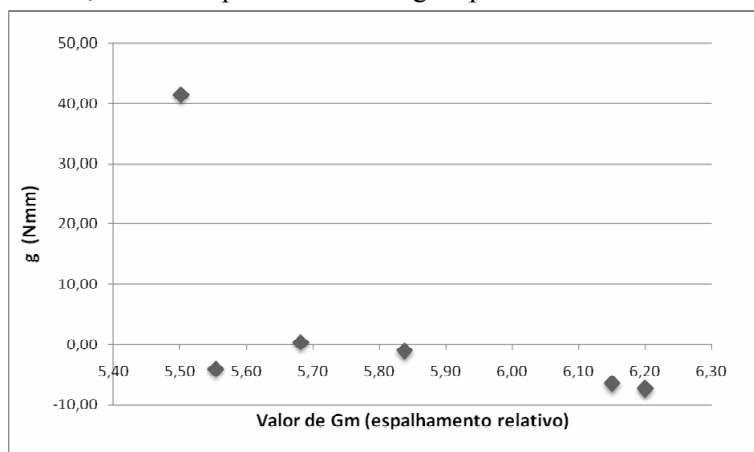


Fig.7. Relação tensão de cedência e espalhamento relativo

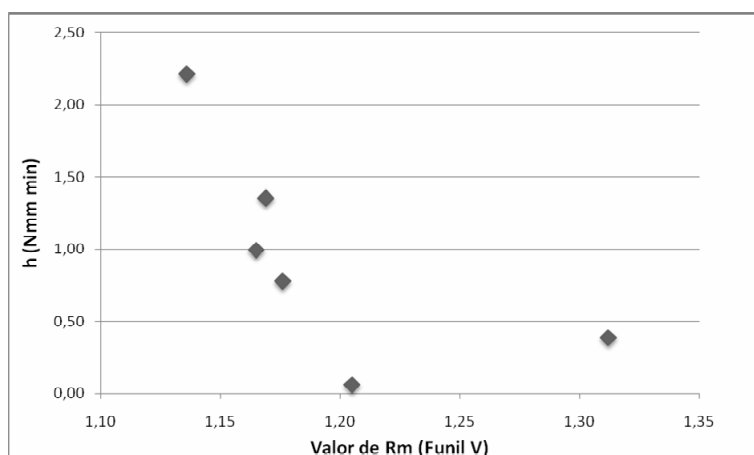


Fig.8. Relação viscosidade plástica e velocidade relativa de escoamento

Na Fig. 8 pode-se constatar que ocorre uma redução acentuada do valor de h (viscosidade plástica) para o acréscimo da velocidade relativa de escoamento. Na Fig. 9 são apresentados os resultados da resistência à compressão obtidos para cada mistura que atingiu o alvo de auto compactabilidade e que foram estudadas na fase fresca. Verifica-se que nas condições de cura de $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e 95% HR, as resistências obtidas crescem com a idade. Tendo em conta o desvio padrão em cada mistura, pode-se afirmar que aos 28 dias só há diferença significativa no resultado da mistura 60C + 40GL em relação as demais misturas. Esta mistura é aquela que apresenta o valor de resistência à compressão mais baixo. Significa que ao incorporar 40% de GL a resistência média é reduzida de 25% do valor da mistura 100C. Porém aos 90 dias foi a mistura que apresentou maior crescimento de resistência, cerca de 40% superior ao resultado de 28 dias. Tendo em conta os desvios padrão dos resultados aos 90 dias das misturas com adições e comparando estes com a mistura 100C, pode-se afirmar que não há diferença entre esta e a mistura 80C + 20FC. As demais misturas são significativamente diferentes da mistura 100C mas não diferentes entre si. Estes resultados corroboram um comportamento normal da evolução das resistências com a idade e o potencial reativo do pó de vidro colocado aqui em evidência pelo aumento importante do valor de resistência de 28 para 90 dias. Neste potencial reativo está descartada, por estudos anteriores [12], uma eventual ação deletéria do pó de vidro à semelhança da reação álcalis – sílica.

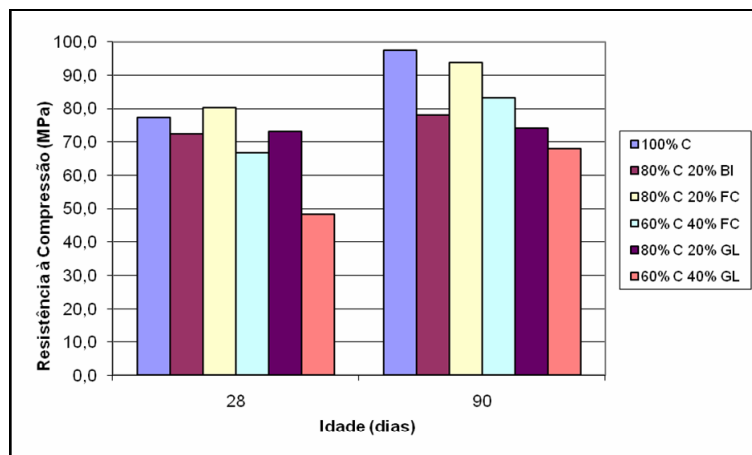


Fig.9. Resistência à compressão aos 28 e 90 dias

4. CONCLUSÕES

A discussão dos resultados apresentada neste artigo conduziu às conclusões que a seguir se apresentam.

Das adições estudadas a cinza de biomassa foi aquela que exigiu maior percentagem de superplastificante para atingir o alvo de auto-compactabilidade. Em contrapartida, a adição de pó de vidro no seu valor superior exigiu um menor consumo de superplastificante.

O modelo de Herschel–Bulkley foi aquele que melhor traduziu o comportamento reológico das misturas auto-compactáveis.

Em termos de comportamentos tixotrópicos, os conteúdos de adições mais elevados 40GL e 40FC apresentaram as áreas das curvas de histereses menores, o que identifica o contributo do aumento dessas adições na reologia das misturas.

Verifica-se que a incorporação das adições estudadas não trazem reduções significativas de resistências à compressão quando estas adições são incorporadas em até 20% de substituição do cimento. Porém, a redução torna-se importante na mistura 60C+40GL tanto aos 28 dias, cerca de 35%, como aos 90 dias, cerca de 30%.

AGRADECIMENTOS

O autor deseja expressar o seu agradecimento ao Alessandro Di Francesco pela sua contribuição na execução dos ensaios de reologia durante estágio IAESTE realizado nos Laboratórios de Construção da Universidade da Beira Interior.

REFERÊNCIAS

- [1] OKAMURA H, OUCHI M. - Self-compacting concrete. J Adv Concr Technol 2003;1(1):5–15.
- [2] FERRARIS C. F. - Measurement of the rheological properties of high performance concrete: state of the art report. J Res Natl Inst Stand Technol 1999;104(5):461–77.
- [3] LARRARD D, FERRARIS C. F, SEDAN T. - Fresh concrete: a Herschel–Bulkley material. Mater Struct 1998; 31(211):494–8.
- [4] BIRD R. B, DAI G. C, YARUSSO B. J. - The rheology and flow of viscoplastic materials. Rev Chem Eng 1983; 1:1–70.
- [5] LU G., WANG K., RUDOLPHI T. J. - Modeling rheological behavior of highly flowable mortar using concepts of particle and fluid mechanics. Cement & Concrete Composites 30 (2008) 1–12
- [6] TOPÇU IB, KOCATASKIN F. - A two-phase composite materials approach to the workability of concrete. Cement Concr Compos 1995;17(4):319–25.
- [7] KUROKAWA Y, TANIGAWA Y, MORI H, NISHINOSONO K. - Analytical study on effect of volume fraction of coarse aggregate on Bingham’s constants of fresh concrete. Trans Jpn Concr Inst 1996;18:37–44.
- [8] PIMANMAS A, OZAWA K. - Mathematical modeling of shear constitutive relationship for flowing fresh concrete. In: Proceedings of ICUEACC, Bangkok, Thailand, 1996; p. D.128–D.133.
- [9] DOMONE, P.L.J.; JIN, J. – Properties of Mortar for Self-compacting Concrete. In Proc. of the 1st Intern. RILEM Symposium on SCC, Sweden, ISBN: 2-912143-09-8, Sept. 1999, p. 109-120.
- [10] NEPOMUCENO M. – Metodologia para a composição de betões auto-compactáveis. Tese de Doutoramento, Covilhã, UBI, Portugal, Março, 2006.
- [11] GOTO, T. - Influence des paramètres moléculaires du latex sur l’hydratation, la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex. Thèse de Doctorat Physique et Chimie des Matériaux, Université Paris VI, France, 2006.
- [12] PEREIRA DE OLIVEIRA L.A., CASTRO GOMES J.P. and SANTOS P. - Optimization on pozzolanic reaction of ground waste glass incorporated in cement mortars. Portugal SB07 Sustainable Construction, Materials and Practices, L. Bragança et al (Eds.) IOS Press, 2007, Part 2, 928-934.